

УДК 537.2:621.642.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ РЕЛАКСАЦИИ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА, ВНОСИМОГО В РЕЗЕРВУАРЫ С ПОСТУПАЮЩЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

*канд. техн. наук, доц. О.Г. ГОРОВЫХ**(Институт переподготовки и повышения квалификации МЧС Республики Беларусь, Минск);**А.Р. ОРАЗБАЕВ**(ТОО «SEMSER Ort Sondirushi», Астана, Республика Казахстан)*

Рассматриваются носители электростатического заряда, образующегося при движении диэлектрической углеводородной жидкости по трубопроводам. Показано, что носители такого электростатического заряда имеют разную природу, следовательно, и время релаксации каждого из видов носителей заряда различно. Предложено математическое выражение для определения времени релаксации всех видов носителей электростатического заряда, учитывающее величину вносимого в резервуар электростатического заряда, изменяющуюся величину поверхности контакта углеводородной жидкости со стенкой резервуара и конфигурацию резервуара. За время релаксации принято время, по истечении которого возникновение искры, необходимой для воспламенения паров паровоздушного пространства, исключается.

Введение. Сегодня в странах СНГ эксплуатируются тысячи стационарных вертикальных и горизонтальных цилиндрических резервуаров, расположенных на территории нефтебаз, АЗС, других объектов хранения и переработки нефтепродуктов. Все резервуары, которые включены в технологический процесс, периодически заполняются и опорожняются. Процессы наполнения и слива углеводородных жидкостей из резервуаров относятся к операциям с повышенной пожароопасностью. При сливно-наливных операциях достаточно часто причиной возникновения пожаров в резервуарах являются разряды статического электричества в виде искр, что является недопустимым во взрыво- и пожароопасных условиях. Методы борьбы с накоплением зарядов статического электричества при операциях с нефтепродуктами регламентированы различными руководящими документами [1, пп. 4.7, 8; 2, п. 5.3; 3, гл. 28; 4; 5].

Для исключения пожаров и взрывов, инициированных искровым разрядом в паровом пространстве резервуаров, в которые происходит загрузка (выгрузка) углеводородных диэлектрических жидкостей с удельным объемным электрическим сопротивлением более 10^9 Ом·м, рекомендуется обеспечивать поддержание определенной допустимой скорости истечения жидкости в аппарат [6, п. 1.2]. Допустимую скорость истечения жидкости в резервуар определяют исходя из необходимости ограничить предельно допустимым значением максимально возможную плотность заряда в приповерхностном слое жидкости,

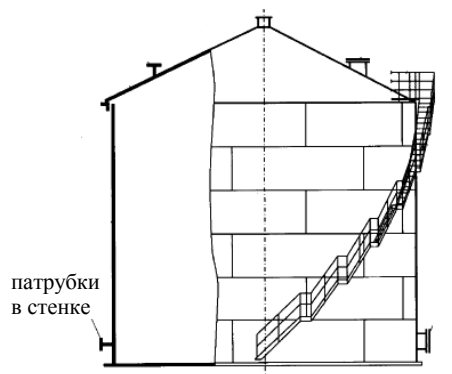
находящейся в заполняемом аппарате (резервуаре), при данном способе загрузки. При этом в соответствии с [6, п. 4.2] предусматривается определение скорости загрузки углеводородной жидкости только в резервуары со сферическим, эллиптическим или коническим днищем, имеющие вертикальный загрузочный патрубок, причем расстояние конца загрузочного патрубка до дна резервуара должно составлять не более чем 200 мм.

Резервуары с нефтепродуктами, эксплуатируемые на нефтехранилищах различного рода, имеют, как правило, боковой ввод загрузочного патрубка (рисунок).

Таким образом, встает вопрос о методиках расчета скорости загрузки, которая может применяться и для резервуаров, интенсивно эксплуатирующихся в настоящее время, в том числе объемом до 20 000 м³, и имеющих горизонтальный ввод загрузочного патрубка. Например, на

головной нефтеперекачивающей станции «Павлодар» АО «КазТрансОйл» в эксплуатации находятся восемь стальных вертикальных резервуаров объемом 20 000 м³, и все имеют боковой патрубок для загрузки нефтепродуктов.

Основная часть. Как известно, носителями электростатического заряда, поступающего с потоком углеводородной диэлектрической жидкости в резервуар, являются как ионы, образовавшиеся в результате диссоциации имеющихся в жидкости электролитов и окислительно-восстановительных реакций, протекающих в двойном электрическом слое на стенке трубопровода, так и заряженные коллоидные частицы, потерявшие при движении жидкости внешнюю сферу. «Мы встречаемся с двумя основными меха-



Резервуар с боковым горизонтальным загрузочным патрубком

низмами электропроводности жидких диэлектриков: электропроводностью ионной и электропроводностью катафорической, обусловленной упорядоченным движением коллоидных частиц» [7, с. 222].

Ионная электропроводность, обусловленная движением ионов, делится на два класса: собственная электропроводность и примесная. Собственная электропроводность диэлектрических жидкостей очень мала и соответствует (определяется) электропроводности глубоко очищенной жидкости. Примесная электропроводность также зависит от степени диссоциации примесей. Степень этой диссоциации зависит от концентрации примесей, структуры молекул примеси, в том числе от величины дипольного момента и от диэлектрической проницаемости растворителя.

Электропроводность, которая складывается только из примесной и собственной электропроводности, можно определить по уравнению [7, с. 228]:

$$\kappa = A_1 \cdot e^{\frac{B_1}{T}} + A_2 e^{\frac{B_2}{T}}, \quad (1)$$

где A_1 и B_1 характеризуют собственные (основные) ионы диэлектрической жидкости и определяются по уравнениям (2) и (3); A_2 и B_2 характеризуют ионы, образующиеся от примесных веществ, и также определяются по уравнениям (2) и (3):

$$A = \frac{n_0 q^2 \delta v}{6kT}; \quad (2)$$

$$B = \frac{E_0}{k}. \quad (3)$$

Здесь n_0 – общее число молекул в 1 см^3 ; q – заряд одновалентного иона, равный $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; δ – длина свободного пробега иона, см; v – частота собственного колебания молекулы в месте закрепления, равная числу попыток молекулы в течение 1 с перескочить потенциальный барьер (достичь возбужденного состояния), с^{-1} ; k – коэффициент, равный $36 \cdot \pi \cdot 10^{-11}$; T – термодинамическая температура, К; E_0 – энергия активации или диссоциации молекул в жидкости (потенциальный барьер), В.

Катафорическая электропроводность определяется количеством полимолекулярных агрегатов, которые образуются при различных процессах. Например, при старении нефтепродукта и естественной полимеризации, при прогреве нефтепродукта и образовании различных смолистых агрегатов, при включении эмульгированной воды, при наличии смесей нефтепродуктов и т.п. Коллоидные частицы, кроме того, могут адсорбировать свободный ион того или иного знака, вследствие чего и приобретают соответствующий заряд [7, с. 235]. Строение полимолекулярных агрегатов, ответственных за катафорическую проводимость, подобно строению коллоидной частицы, имеющей внутренний (адсорбционный) и внешний (диффузионный) слои. В зависимости от скорости движения углеводородной жидкости диффузионный слой частицы, ответственной за катафорическую проводимость, отстает от движения самой частицы, и поток углеводородной жидкости переносит заряд, соразмерный с числом частиц, не имеющих внешнего диффузионного слоя. Количество образовавшихся ионов, формирующих катафорическую проводимость, напрямую зависит от скорости потока жидкости.

Каждый из перечисленных видов ионов, обеспечивающих возникновение электростатического заряда в движущемся потоке диэлектрической жидкости, будет иметь свое собственное время релаксации. Причем если нейтрализовать ионы (к примеру, с помощью заземления), образовавшиеся в результате диссоциации примесей или молекул нефтепродукта, рассеивание и нейтрализация катафорического заряда, будет зависеть от времени формирования внешнего диффузионного, нейтрализующего заряд коллоидных частиц слоя.

Катафорическую электропроводность можно определить из следующего выражения [7, с. 236]:

$$\kappa_{\text{кат}} = r \cdot n_0 \frac{\epsilon^2 \xi^2}{6\pi\eta}, \quad (4)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость жидкости; r – радиус полимолекулярной частицы, несущей заряд, м; n_0 – число заряженных коллоидных частиц в 1 см^3 жидкости; ξ – электрокинетический потенциал; η – вязкость жидкости.

Заряд, вносимый заряженными частицами, обеспечивающими катафорическую проводимость, равен

$$q_{\text{кат}} = \epsilon \cdot \xi \cdot r \cdot n_0 \cdot S \cdot v \cdot \tau, \quad (5)$$

где S – площадь сечения трубопровода, м^2 ; v – скорость движения жидкости в трубопроводе, м/с; τ – текущее время поступления жидкости в резервуар, с.

Для определения вероятности пожаро- и взрывобезопасного состояния в паровом пространстве резервуара необходимо определить время релаксации поступающего и формируемого в процессе загрузки в резервуар объемного электростатического заряда, который выносится на поверхность жидкости и формирует ее поверхностный электростатический заряд. Чем больше время релаксации (например, составляет несколько минут), тем больше вероятность электростатического разряда, сформированного на поверхности жидкости электростатического заряда, с последующим воспламенением паров загружаемой углеводородной горючей жидкости.

Известно, что снижение (уменьшение) объемного заряда в диэлектрике протекает по экспоненциальному закону [8, с. 17]:

$$q_{\tau} = q_{исх} \cdot e^{-k_{\text{рел}} \tau}, \quad (6)$$

где q_{τ} – объемный электростатический заряд, релаксирующий в течение времени τ , Кл/м³; $q_{исх}$ – исходный объемный электростатический заряд, Кл/м³; $k_{\text{рел}}$ – коэффициент пропорциональности (константа времени релаксации), с⁻¹; τ – время, в течение которого происходит изменение (уменьшение) электростатического заряда, с.

Исходный объемный электростатический заряд включает как заряд, сформированный носителями ионной проводимости, так и катафорической проводимости.

$$q_{исх} = q_{ион} + q_{кат}. \quad (7)$$

Если за время релаксации $\tau_{\text{рел}}$, будем считать время, необходимое для достижения безопасной концентрации объемного или поверхностного электростатического заряда в жидкости, то его можно определить из уравнения (6):

$$\tau_{\text{рел}} = \frac{\ln \frac{q_{исх}}{q_{без}}}{k_{\text{рел}}} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{q_{исх}}{q_{без}}}{\alpha}, \quad (8)$$

где $q_{исх}$ – электростатический заряд, находящийся в объеме жидкости при поступлении в резервуар, Кл; $q_{без}$ – безопасная величина электростатического заряда, не приводящая к возникновению пожароопасных разрядов на поверхности жидкости, Кл; $k_{\text{рел}}$ – константа времени релаксации, $\alpha/(\varepsilon_0 \cdot \varepsilon)$, с⁻¹; ε – диэлектрическая проницаемость углеводородной жидкости; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость, равная $1,845 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; α – удельная электропроводность (проводимость) среды (величина, обратная удельному объемному электрическому сопротивлению жидкости), Ом⁻¹·м⁻¹.

Для определения предельно допустимого (безопасного) значения плотности заряда (предельно допустимое значение плотности заряда определяется как плотность заряда в объеме жидкости, при которой вероятность возникновения разряда с энергией, равной 0,25 минимальной энергии зажигания смеси паров этой жидкости с воздухом, не превосходит 10^{-3} [6, п. 1.5]) используют уравнение (9), приведенное в [6, п. 2.2]:

$$q_{без} = 9 \cdot 10^{-10} \cdot W_{\text{мин}}^{1/4} \cdot e^{\frac{-\varphi}{4}}, \quad (9)$$

где $W_{\text{мин}}$ – минимальная энергия зажигания среды над поверхностью жидкости, Дж; φ – безразмерный коэффициент, определяется по (10):

$$\varphi = -45,01 + \ln \left(\varepsilon \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{нат}}}{k_n}} \right), \quad (10)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость жидкости; $\sigma_{\text{нат}}$ – поверхностное натяжение жидкости, кг/см²; $k_n = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot R_v$ – постоянная времени релаксации заряда в жидкости, с; ε_0 – электрическая постоянная, равная $8,854 \cdot 10^{-12}$, Ф/м; R_v – удельное объемное электрическое сопротивление жидкости, Ом·м.

Подставляя уравнение (9) в уравнение (8), получаем выражение 11:

$$\tau_{\text{рел}} = \frac{\ln \frac{q_{исх}}{q_{без}}}{k_{\text{рел}}} = \frac{\ln \frac{q_{исх} \cdot 10^{10}}{9W^{0,25}} + \frac{\varphi}{4}}{k_{\text{рел}}} = \frac{\ln \frac{(q_{ион} + q_{кат}) \cdot 10^{10}}{9W^{0,25}} + \frac{\varphi}{4}}{k_{\text{рел}}} = \frac{\ln \frac{(q_{ион} + \varepsilon \cdot \xi \cdot r \cdot n_0 \cdot S \cdot v \cdot \tau) \cdot 10^{10}}{9W^{0,25}} + \frac{\varphi}{4}}{k_{\text{рел}}}, \quad (11)$$

Анализ уравнения (11) показывает, что время релаксации всех носителей электростатических зарядов не зависит от конструкции резервуара, в то время как количество выносимых на поверхность катодических ионов (более долгоживущих) зависит от времени пребывания их в объеме жидкости для восстановления диффузионной оболочки. Поэтому для определения времени релаксации в данном резервуаре, то есть времени, необходимом для рассеивания внесенного потоком жидкости электростатического заряда и исключения возможности возникновения искрового разряда, имеющего энергию, достаточную для последующего воспламенения среды, необходимо учитывать конфигурацию резервуара. Коэффициент, отражающий влияние конструкции резервуара на формирование опасной величины поверхностного электростатического заряда, должен учитывать величину площади поверхности стенок резервуара, непосредственно контактирующей в каждый момент времени с жидкостью, и поверхность зеркала жидкости.

Знание константы времени релаксации $k_{\text{рел}}$ позволяет определить общее время релаксации $\tau_{\text{рел}}$ – промежуток времени, за который начальный электростатический заряд уменьшится до величины, позволяющей безопасную эксплуатацию системы. Время релаксации – это величина, зависящая линейно от константы времени релаксации только при сохранении площади утечки заряда и конструкции резервуара.

Учитывая изменение площади, с которой происходит утечка заряда (что наблюдается при заполнении резервуара), и конфигурацию (резервуары разных конструкций), уточненное время релаксации ($\tau_{\text{рел}}^1$), можно определить по следующей зависимости:

$$\tau_{\text{рел}}^1 = \frac{\ln \frac{(q_{\text{ион}} \cdot k_s^{-1} + k_{\text{кон}} \cdot \varepsilon \cdot \xi \cdot r \cdot n_0 \cdot S \cdot v \cdot \tau) \cdot 10^{10}}{9W^{0,25}} + \frac{\Phi}{4}}{k_{\text{рел}}}, \quad (12)$$

где k_s – коэффициент, учитывающий площадь утечки заряда (площадь стенок резервуара, контактирующей с жидкостью; $k_{\text{кон}}$ – коэффициент, учитывающий конструкцию резервуара (вертикальный, горизонтальный; эллиптическое, коническое, плоское дно) и конструкцию загрузочного патрубка, которая определяет время нахождения ионов полимолекулярных агрегатов до выхода на поверхность.

Коэффициент $k_{\text{кон}}$ учитывает вращательные процессы движения жидкости при ее загрузке в резервуар, которые зависят как от вида загрузочного патрубка, так и кривизны днища и скорости загрузки жидкости в резервуар, устанавливается экспериментально для каждого вида резервуара или с помощью гидродинамического моделирования, например, с использованием программного комплекса гидродинамических расчетов FlowVision.

Коэффициент k_s для вертикального резервуара можно найти по выражению (12), приняв, что величина заряда, утекающего с единицы поверхности, есть величина постоянная и не зависит от места присоединения заземляющего кабеля и нахождения над уровнем земли:

$$k_s = k_{y0} \int_0^{\tau} \left(\pi r^2 + \frac{2Q\tau}{r} \right), \quad (13)$$

где k_{y0} – количество заряда, релаксирующего с единицы площади, Кл/м²; r – радиус вертикального резервуара, м; Q – расход жидкости, поступающей в резервуар, м³/с; τ – текущее время от начала заполнения резервуара, с.

Величина k_{y0} может изменяться для данного резервуара с течением времени, так как стенки резервуара покрываются коррозией, на них происходит отложение смолистых и серосодержащих соединений различной проводимости, изменяются и условия токоприема системой заземления. С учетом уравнения (12) уточненное время релаксации для вертикального резервуара будет равно

$$\tau_{\text{рел}}^1 = \frac{\ln \frac{\left\{ q_{\text{ион}} \left[k_{y0} \int_0^{\tau} \left(\pi r^2 + \frac{2Q\tau}{r} \right) \right]^{-1} + k_{\text{кон}} \cdot \varepsilon \cdot \xi \cdot r \cdot n_0 \cdot S \cdot v \cdot \tau \right\} \cdot 10^{10}}{9W^{0,25}} + \frac{\Phi}{4}}{k_{\text{рел}}}. \quad (14)$$

Заключение. Предложено математическое выражение для определения уточненного времени релаксации, вносимого в резервуары цилиндрические вертикальные всех видов носителей электростатического заряда с потоком поступающей при загрузке резервуара жидкости. Математическое выражение учитывает величину вносимого в резервуар электростатического заряда, изменяющуюся величину поверхности контакта углеводородной жидкости со стенкой резервуара и конфигурацию резервуара, что

позволяет оценить время, в течение которого при загрузке резервуара может произойти искровой разряд, влекущий за собой взрыв паровоздушной среды углеводородной жидкости с последующим горением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Требования к безопасности нефтебаз и автозаправочных станций. Технический регламент: утв. постановлением Правительства Республики Казахстан от 29 мая 2008 года № 514.
2. Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных нефтепроводов и нефтебаз: РД 153-39.4-078-01. – Введ. 10.04.2001 (Приказ ОАО АК «Транснефть» № 25 от 12.05.2001). – Уфа, 2001.
3. Правила технической эксплуатации складов нефтепродуктов: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 30.09.2004 № 31.
4. Правила пожарной безопасности Республики Беларусь для объектов хранения, транспортирования и отпуска нефтепродуктов: ППБ 2.11-2001: утв. постановлением М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь 16 января 2002 г. № 4. – Минск, 2002.
5. Требования промышленной безопасности при эксплуатации нефтебаз и автозаправочных станций: утв. приказом М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Казахстан от 25 июля 2008 года № 132.
6. Допустимые скорости движения жидкостей по трубопроводам и истечения в емкости (аппараты, резервуары). Руководящий технический материал: РТМ 6-28-007-78 / М-во химической промышленности. – 68 с.
7. Сканава, Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей) / Г.И. Сканава. – Москва–Ленинград: Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1949. – 500 с.
8. Stratton, J.A. Electromagnetic Theory / J.A. Stratton. – New York and London: McGRAW-HILL BOOK Company, Inc, 1941. – 615 s.

Поступила 12.03.2015

TIME SPECIFICATION OF VOLUME ELECTROSTATIC CHARGE RELAXATION BROUGHT IN TANKS WITH DIELECTRIC HYDROCARBONIC LIQUID

O. GOROVICH, A. ORAZBAEV

Carriers of the electrostatic charge which is formed at the movement of dielectric hydrocarbonic liquid on pipelines are considered. It is shown that as carriers of an electrostatic charge have the different nature, and time of a relaxation of each of types of carriers of a charge is different. The formula for definition of time of a relaxation of all types of carriers of an electrostatic charge considering the size of the electrostatic charge brought in the tank, the changing size of a surface of contact of hydrocarbonic liquid with a wall of the tank and a tank configuration is offered. As relaxation time is taken the time after which emergence of a spark necessary for ignition of vapors of steam-air space is excluded.